

K-대역 감쇠량 표준기의 설계 및 제작

Design and Fabrication of K-band Attenuation Standard

이주광 · 김정환 · 강진섭 · 강태원

Joo-Gwang Lee · Jeong-Hwan Kim · Jin-Seob Kang · Tae-Weon Kang

요 약

K-대역에서 동작하는 3.5 mm 동축형 감쇠량 표준기를 개발하고 그 측정 불확도를 평가하였다. 전력비 전달방식의 4개의 모듈로 구성된 이 표준기는 18 GHz부터 26.5 GHz까지의 광대역에서 동작하며 각 모듈은 약 20 dB의 감쇠량을 가진다. 측정 가능한 최대 감쇠량은 80 dB이고 이때의 확장 불확도는 약 95 % 신뢰수준에서 0.01 dB이다.

Abstract

In this paper, measurement scheme and uncertainty estimation of the K-band attenuation standard fitted with 3.5 mm coaxial connectors are described. The standard comprises a build-up chain of four steps of power ratio measurement and operates in the frequency range of 18 GHz to 26.5 GHz. The nominal attenuation of each step is around 20 dB and total dynamic range is 80 dB. The expanded uncertainty of the overall system is 0.01 dB at the confidence level of approximately 95 %.

Key words : Microwave Attenuation, K-band Attenuation, Calibration, Measurement Uncertainty, Standard Attenuator

I. 서 론

감쇠기의 감쇠량을 측정하는데 사용되는 회로망 분석기나 스펙트럼 분석기 등의 기기들은 국가 교정 기관에서 정기적으로 교정을 받음으로써 측정의 정확도를 유지한다. 국가 교정 기관들은 각 나라의 국가측정표준대표기관(NMI: National Metrology Institute)에서 교정을 받음으로써 상위 표준인 국가 표준에 소급성(traceability)을 유지하게 된다^{[1],[2]}.

각 나라의 NMI에서 감쇠량의 국가 표준을 유지하기 위한 감쇠량 표준기로는 WBCO(Waveguide Below CutOff) 감쇠기가 많이 사용되지만 WBCO는 구조가 복잡하고 제작 비용이 비싼 것이 단점이다. WBCO는 제작 특성상 1.25 MHz 또는 30 MHz에서 동작하도록 설계된 것이 주로 사용된다^[3]. 1 kHz 또는 10 kHz, 즉 음성 주파수 대역에서 동작하는 감

쇠량 표준기로는 IVD(Inductive Voltage Divider)가 사용된다. WBCO나 IVD는 특정 주파수에서 동작하기 때문에 다른 주파수에서의 감쇠량을 측정하기 위해서는 혼합기(mixer)를 사용하여 신호의 주파수를 감쇠량 표준기가 동작하는 주파수로 변환하여야 한다. 이러한 측정 방식을 기준 주파수의 주파수에 따라 IF 대체법(IF substitution method) 또는 AF 대체법(AF substitution method)이라고 한다^[4]. 이러한 방식의 단점은 감쇠량 측정의 정확도가 믹서 직선성의 정확도에 크게 의존한다는 것이다. 특히 밀리미터파 대역에서는 믹서에 공급되는 신호원(local oscillator)의 주파수를 낮게 유지하기 위하여 고조파 믹서(harmonic mixer)가 주로 사용되기 때문에 이런 영향이 더 크게 나타난다.

최근에 우리는 새로운 방식의 광대역(10 MHz~18 GHz) 감쇠량 표준기를 개발하였다^[5]. 이 표준기

한국표준과학연구원 기반표준부 전자기그룹(Electromagnetic Metrology Group, Korea Research Institute of Standards and Science)

· 논문 번호 : 20060323-025

· 수정완료일자 : 2006년 4월 12일

는 측정하려는 소자(device under test)와 같은 주파수에서 동작하기 때문에 주파수를 변환하기 위한 믹서를 필요로 하지 않는다. 이 논문에서는 K-대역 (18 GHz~26.5 GHz)에서 동작하는 광대역 감쇠량 표준기를 소개한다. II절에서는 이 표준기의 동작 원리와 특징을 설명하고 III절에서는 측정 불확도를 평가한 결과를 보인다.

II. K-대역 감쇠량 표준기의 동작원리

18 GHz~26.5 GHz 주파수 대역에서 감쇠량 측정의 소급성을 확립하기 위하여 전력비 방식의 광대역 감쇠량 표준기를 제작하고 특성을 평가하였다. 그림 1은 감쇠량 표준기의 개념도이고, 그림 2는 제작된 표준기의 내부를 보여주는 사진이다. 부품 사이의 연결은 3.5 mm semi-ridged cable을 사용하였다. 연결 케이블의 삽입 손실이 최대한 작아지도록 부품을 배치하였다. 주위 온도 변화에 의한 영향을 작게 하기 위하여 서미스터 마운트(thermistor mount)는 알루미늄 블록(block)위에 알루미늄 브래킷(bracket)을 사용하여 고정시켰다.

전력비 방식의 감쇠기는 구조가 간단하고 정확도가 매우 높지만 20 dB 이상의 감쇠량 측정이 어려운 단점이 있다⁶⁾. 개발된 감쇠량 표준기는 80 dB의 감쇠량 측정이 가능하도록 하기 위해서 측정 범위가 20 dB인 서미스터 마운트로 구성된 감쇠기 모듈(module) 4개를 직렬로 연결하였다. 일반적으로 전력비 방식은 서미스터 마운트를 연결하는 데 사용되는 마이크로파 스위치의 스위칭 반복도 오차로 인하여 높은 정확도를 얻기가 어렵다. 그러나 이 감

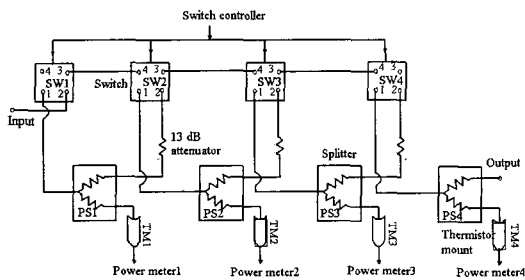


그림 1. K-대역 감쇠량 표준기의 개념도
Fig. 1. Block diagram of the K-band attenuation standard.

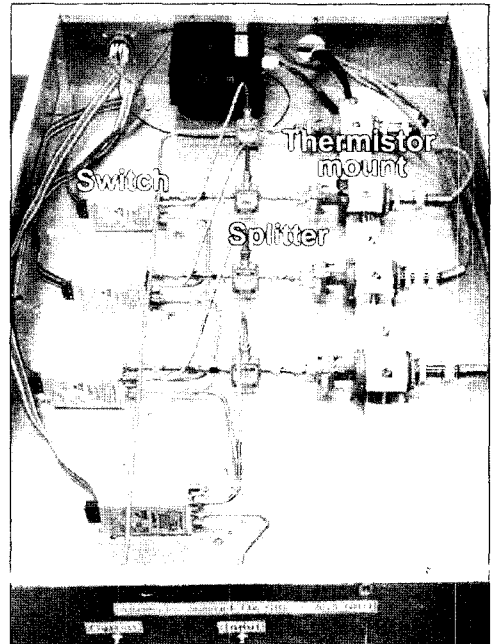


그림 2. K-대역 감쇠량 표준기의 내부
Fig. 2. A photograph of the K-band attenuation standard.

쇠기는 그림 3에서와 같은 새로운 방식으로 연결하기 때문에 스위치의 스위칭 반복도(repeatability)에 의한 영향을 받지 않는다. 그림 3에 보이는 것처럼 먼저 기준 신호를 측정하는 단계에서는 밀리미터파 신호가 R이라고 표시된 점선을 따라 흐르고 이때 출력단에서의 신호의 크기를 전력계(power meter) 4로 측정한다. 다음에 sw3과 sw4 스위치의 연결 상태를 바꾸면 신호는 T라고 표시된 점선을 따라 흐

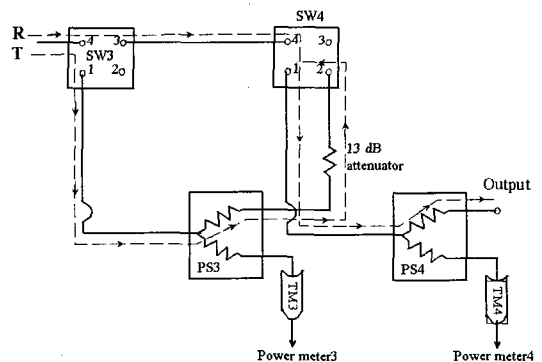


그림 3. 기준 신호와 측정 신호의 흐름도
Fig. 3. Flow diagram of reference and test signals.

른다. 이 신호는 약 7 dB의 삽입 손실을 가지는 분배기(power splitter) ps3와 13 dB 고정 감쇠기(fixed attenuator)에 의해서 약 20 dB 정도 감쇠되고 이때의 출력단에서의 신호의 크기를 전력계 4로 다시 측정한다. 다음 단계에서 사용하기 위해서 전력계 3으로 ps3 출력단에서의 신호의 크기도 측정해 둔다. R 단계에서 측정한 전력계 4의 값과 T 단계에서 측정한 값의 비율이 증가 감쇠량(A4)이고 약 20 dB의 값을 가진다. 같은 방식으로 sw2와 sw3의 연결 상태를 바꾸고 측정한 값으로부터 A3를 구할 수 있다. A4 값을 구한 다음에는 스위치 sw4의 연결 상태가 변하지 않음을 알 수 있다. 즉, ps3의 출력단으로부터 ps4의 출력단까지의 감쇠량은 변동이 없기 때문에 스위치의 반복도에 의한 영향을 무시할 수 있다.

18 GHz 이하용 감쇠량 표준기에 사용된 dual-type 서미스터 마운트는 두 서미스터의 구조가 마이크로파 신호에 대해서는 병렬로 되어, 있는 반면에 dc 신호에 대해서는 직렬로 연결되어 있으므로 인해서 불가피하게 dual-element 오차가 생기게 된다^[7]. K-대역 감쇠량 표준기는 single-type 서미스터 마운트를 사용함으로써 이 문제를 해결하였다. 또한, 이 표준기는 절대 전력의 크기가 아닌 전력비(power ratio)를 측정함으로써 부정합 불확도, 분배기의 양쪽 출력 단자의 비대칭에 의한 오차, 서미스터 마운트의 효율(eficiency)에 의한 오차가 모두 상쇄되어 매우 우수한 특성을 나타내게 된다.

III. 감쇠량 표준기의 불확도

일반적으로 측정 불확도(measurement uncertainty)는 A형이나 B형과 같은 평가방법에 따라 평가된다^[8]. A형 표준불확도의 평가는 반복적인 측정을 통해 얻은 통계적인 분석으로부터 불확도를 평가하는 방법이다. B형 표준불확도의 평가는 통계적인 분석과는 다른 과학적인 지식 등으로부터 불확도를 평가하는 방법이다. 마이크로파 스위치를 변화시키지 않은 상태에서 10번 측정한 값으로부터 구한 반복 측정의 불확도는 0.001 dB이다. 장기안정도라고 할 수 있는 신호발생기의 드리프트(drift)는 2분 동안 측정한 결과 ±0.002 dB 이내이다. 신호원은 RF power level control unit(TEGAM 1805B)를 사용하면

입력 레벨의 변화를 모니터링 하여 그 차이를 보상해 주기 때문에 불확도를 더욱 작게 할 수 있다. 이때 신호원의 출력은 분배기에 의하여 둘로 나누어져 하나는 RF power level control unit에 연결되어 있는 서미스터 마운트에 인가되어 신호 레벨의 모니터링용으로 사용되고, 다른 하나는 감쇠량 표준기의 입력단에 연결된다. 누설(leakage)로 인하여 감쇠량 측정에 발생하는 오차는 다음 식으로 표시할 수 있다^[4].

$$\Delta A_L \approx \mp 8.686 \{10^{-(A_L - A_s)/20}\} \quad (1)$$

여기서 A_s 는 신호가 진행하는 경로(path)의 삽입 손실이고, A_L 은 누설 신호가 진행하는 경로의 삽입 손실이다. Agilent 87222C 스위치의 아이솔레이션 특성이 26.5 GHz에서 70 dB 이상이므로 입력 단자와 출력 단자 사이의 A_L 은 140 dB 이상이 되고 60 dB 감쇠량을 측정할 경우에 A_s 는 60 dB이므로 누설로 인한 불확도는 0.000 86 dB 이하이다. 서미스터 마운트와 조합으로 전력을 측정하는 type IV 전력계의 불확도 요인으로는 브리지 평형(bridge balance)의 불안정과 브리지 전류의 드리프트가 있으며 이 값은 합해서 0.000 2 dB 이하이다. 단기 안정도라고도 부르는 잡음에 의한 불확도는 6.5 dBm과 -13.5 dBm 사이에서 20 dB 감쇠량을 측정할 값과 5 dBm과 -15 dBm 사이에서 측정한 값을 비교하여 구하였다. 신호 발생기가 10 dBm을 출력할 경우에 고조파(harmonics) 특성이 -50 dBc 이하이고 이 신호를 증폭하는 데 사용되는 전력 증폭기의 3 dB 컷오프(cutoff) 주파수가 29 GHz이기 때문에 측정하려는 주파수 대역에서는 고조파에 의한 오차 요인은 무시할 수 있을 정도이다. Type IV 전력계의 측정값은 식 (2)의 전력 측정식에 의해 구해진다^[9]. 식 (2)에서 V_{on} 은 type IV 브리지에 연결된 서미스터 마운트에 마이크로파 전력이 가해졌을 때의 dc 출력 전압이고, V_{off} 는 전력이 가해지지 않았을 때의 dc 출력 전압이다.

$$P = \frac{K}{R_0} (V_{off}^2 - V_{on}^2) \quad (2)$$

K 는 서미스터 마운트의 교정 인자(calibration factor)이고 R_0 는 서미스터 마운트의 저항으로서 200

Ω이다. 신호 발생기의 변동에 의한 오차를 줄이기 위하여 V_{off} 는 다음과 같은 방법으로 측정한다. 먼저 마이크로파 신호를 인가하지 않은 상태에서 $V_{off,i}$ 를 측정한 후에 신호를 인가하고 V_{on} 을 측정하고 다시 신호를 제거하고 $V_{off,f}$ 를 측정한다. 서미스터 마운트의 드리프트가 선형적이라는 가정 하에 식 (3)에 의해 V_{on} 측정시의 V_{off} 값을 구한다.

$$V_{off} = V_{off,i} + \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} (V_{off,f} - V_{off,i}) \quad (3)$$

여기서 t_1, t_2, t_3 는 각각 $V_{off,i}, V_{on}, V_{off,f}$ 을 측정한 시각을 나타낸다. 전압 측정값의 오차에 의한 전력 측정 불확도는 식 (2)와 식 (3)의 미분을 취하여 구해진다.

$$dP = \frac{2}{R_0} (V_{off} dV_{off} - V_{on} dV_{on}) \quad (4)$$

$$dV_{off} = \left(1 - \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1}\right) dV_{off,i} + \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} dV_{off,f} \quad (5)$$

측정에 사용한 Agilent 3458A 디지털 볼트미터의 장비 사양으로부터 필요한 데이터를 식 (4)에 대입하여 구하면 $dP=0.06 \mu W$ 이므로 1 mW 측정시에 오차는 0.006 %, 즉 0.000 26 dB이다. 20 dB 감쇠량 측정시의 측정값이 각각 6 mW, 0.06 mW일 때 불확도는 0.002 9 dB이다.

지금까지 설명한 불확도 성분을 표 1에 정리하였다. 불확도 성분들은 각각의 확률분포함수에 따라 1 σ 값(포함인자 $k=1$)으로 변환하였다. 각각의 불확도 성분들이 서로 독립적이라는 가정 하에 각 성분

들의 제곱합으로 구해진 합성 표준 불확도는 0.0025 dB이다. 합성 표준 불확도에 포함인자 2를 곱해서 얻어진 신뢰수준 약 95 %에서의 확장 불확도는 0.005 dB이다. 이 감쇠량 표준기의 최대 감쇠량인 80 dB 측정시의 확장 불확도는 0.01 dB이다.

참고로, 일반적인 상용 회로망 분석기로 20 dB 감쇠기를 측정할 때의 확장 불확도는 0.1 dB 정도이고, 60 dB 측정시는 0.2 dB 정도이다. 세계 최고 수준의 측정 능력을 보유한 영국 NPL(National Physical Laboratory)은 IVD를 감쇠량 표준기로 사용하고 있다. NPL이 주장하는 최고 측정 능력(CMC: Calibration and Measurement Capability)은 20 dB 감쇠기 측정시의 확장 불확도가 0.04 dB, 80 dB의 경우는 0.016 dB이다^[10].

IV. 결 론

K-대역에서 동작하는 3.5 mm 동축형 감쇠량 표준기를 개발하고 그 측정 불확도를 평가하였다. 전력비 전달 방식의 4개의 모듈로 구성된 이 감쇠량 표준기는 18 GHz부터 26.5 GHz의 광대역에서 동작하며 각 모듈은 약 20 dB의 감쇠량을 가진다. 각 모듈에서는 정확도가 우수한 전력비 방식으로 20 dB의 감쇠량을 측정하고 독특한 방식으로 모듈들을 연결하여 최대 80 dB까지의 감쇠량 측정이 가능하게 되었다. 측정에 미치는 불확도 요인들을 평가한 결과 각 모듈의 확장 불확도는 약 95 % 신뢰수준에서(포함 인자 $k=2$) 0.005 dB이고, 80 dB 측정시의 확장 불확도는 0.01 dB이다. 이 측정 불확도는 상용 회로망 분석기에 비해서는 10배 이상 우수한 수준

표 1. 불확도 총괄표(감쇠량: 20 dB, 주파수: 22 GHz)

Table 1. Uncertainty budget for the attenuation measurement of 20 dB at 22 GHz.

Source of uncertainty	Standard uncertainty(dB)	Probability distribution	Uncertainty contribution(dB)	Type
dc measurement	0.002 9	Rectangular	0.001 7	B
Type IV power meter	0.000 2	Rectangular	0.000 12	B
Source drift	0.002	Rectangular	0.001 2	B
Noise	0.001 1	Rectangular	0.000 64	B
Harmonics	0.001	Rectangular	0.000 58	B
Leakage	0.000 01	Rectangular	0.000 01	B
Repeated measurements	0.001	Normal	0.001	A
확장불확도($k=2$)			0.005	

이고 IVD나 WBCO 같은 감쇠량 표준기를 사용하는 시스템과 비슷한 수준이다.

이 감쇠량 표준기는 스펙트럼 분석기, EMI 수신기의 선형성(linearity)을 직접적으로 교정하거나 직렬 RF 대체법의 표준 감쇠기로 사용하여 가변 감쇠기(step attenuator)를 교정하는 데 사용된다.

참 고 문 헌

- [1] R. Yell, "Traceability-The national roles", *IEE Colloquium on Accreditation of RF Measurement*, London, UK, pp. 2/1-2/4, Feb. 1993.
- [2] C. D. Ehrlich, S. D. Rasberry, "Metrological timelines in traceability", *Metrologia*, vol. 34, pp. 503-514, 1997.
- [3] D. H. Russel, "The waveguide below-cutoff attenuation standard", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, no. 12, pp. 2408-2413, Dec. 1997.
- [4] F. L. Warner, *Microwave Attenuation Measurement*, Peter Peregrinus Ltd., pp. 119-131, 1977.
- [5] Joo-Gwang Lee, Jeong-Hwan Kim, Jeong-IL Park, and Ung-Taeg Kang, "Uncertainty evaluation of a broadband attenuation standard", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 2, pp. 705-708, Apr. 2005.
- [6] H. Bayer, "An error analysis for the RF-attenuation measuring equipment of the PTB applying the power method", *Metrologia*, vol. 11, pp. 43-51, 1975.
- [7] Agilent Technologies, *Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements*, Agilent Technologies, Palo Alto, CA, Application Note 64-1C, p. 20, 2001.
- [8] KRISS-99-070-SP, 측정불확도 표현 지침, 한국표준과학연구원, 1999년.
- [9] J. A. Jargon, R. A. Ginley, and D. D. Sutton, "The NIST 30 MHz linear measurement system", *Journal of Research of the NIST*, vol. 99, no. 1; pp. 19-30, Jan.-Feb. 1994.
- [10] BIPM Key Comparison Database Appendix-C, Calibration and Measurement Capabilities of National Metrology Institutes, <http://kcdb.bipm.fr/appendixC>.

이 주 광



1984년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 1994년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2000년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1986년 7월~현재: 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기그룹

[주 관심분야] 전자파 측정표준(감쇠량, 펄스특성), EMC 측정표준

김 정 환



1978년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1980년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1981년 10월~현재: 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기그룹

[주 관심분야] 전자파 측정표준(RF 전압, 전력, 안테나 특성, 물질상수)

강진섭



1987년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)

1989년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1994년 3월~1995년 3월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 위촉연구원

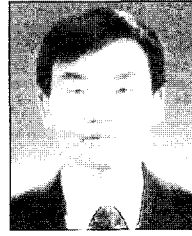
1995년 3월~1996년 2월: University of Illinois at Urbana-Champaign, Dept. of Electrical and Computer Eng., Postdoctoral Research Associate

1996년 3월~1998년 2월: 충북대학교 전기전자공학부 초빙조교수

1998년 3월~현재: 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기그룹 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 측정표준(임피던스, 고이득 안테나 특성), 전자파 산란 및 역산란, 수치해석 등

강태원



1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1990년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학석사)

2001년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

1990년 2월~현재: 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기그룹

[주 관심분야] 전자파 측정표준(잡음온도, 전력), EMC 측정표준